

Acerca de cubits de estado sólido

M.C. José Román Castro San Agustín
Centro Universitario UAEM Valle de Chalco, UAEMex
America Akari Uc Guerra

Centro Universitario UAEM Valle de Chalco, UAEMex
Dr. Manuel Ávila Aoki
Centro Universitario UAEM Valle de Chalco, UAEMex

Abstract:

The several different quantum processors machines evolve continuously. Advances on the main technologies of quantum processors based on solid state qubits are disclosed. It is intended that a non-specialized reader knows the main technologies of frontier on Quantum Computation. Present work is based on a qualitative documental methodology.

Key words: Qubit; impurities; superconductors; solid state

Resumen:

Las diferentes tecnologías de máquinas procesadoras cuánticas de la información evolucionan continuamente. Avances de las principales tecnologías de procesadores cuánticos basados en qubits de estado sólido son divulgados. Se pretende que un lector no especializado conozca las principales tecnologías de la Computación Cuántica de frontera. El presente trabajo se basa en una metodología cualitativa documental.

Palabras claves: Qubit, impurezas, superconductores, estado sólido

Introducción

Un qubit es la unidad lógica mínima de procesamiento cuántico de la información. Matemáticamente se le representa por la siguiente expresión (Hidary, 2019):

$$|\varphi\rangle = A|0\rangle + B|1\rangle, \quad (1)$$

donde A y B son números complejos que satisfacen $|A|^2 + |B|^2 = 1$. El poderío del procesamiento cuántico de la información es que el qubit puede estar simultáneamente en los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$, eso si, con diferentes probabilidades de población cada uno. Esto es, $|A|^2$ es la probabilidad

de que una medición del qubit esté en el estado $|0\rangle$, mientras que $|B|^2$ es la probabilidad de que este esté en el estado $|1\rangle$. Todo lo anterior, de manera simultánea.

En la actualidad hay muchos esfuerzos para desarrollar y construir experimentalmente computadoras cuánticas operativas (Hidary, 2019). En este punto surge la siguiente pregunta: ¿computadoras cuánticas, para qué? Servirían para el diseño de materiales como por ejemplo superconductores a temperatura ambiente. Podrían servir para disminuir el efecto invernadero o producir nuevos fertilizantes. Se podrían hacer búsquedas rápidas de *Big Data*. Identificación de enfermedades genéticas. Predicciones del clima o financieras. También para decodificar códigos criptográficos con métodos modernos (Montanaro, 2016).

El reto tecnológico es diseñar y preparar experimentalmente estados básicos $|0\rangle$ y $|1\rangle$ así como sus superposiciones dadas por la ecuación (1). Otro reto tecnológico es el de diseñar y construir experimentalmente procesadores de muchos qubits. A la fecha se han construido procesadores con un máximo de 14 a 17 qubits (Monz, 2011; IBM, 2021). Es aquí que entran los qubits de estado sólido que es una tecnología prometedora para diseñar procesadores de un número grande de qubits. En dicha tecnología el sistema que codifica el bit cuántico o Qubit se codifica en un material sólido. Las técnicas de fabricación son similares al de la microelectrónica que integra muchos qubits en chips milimétricos. Los qubits de estado sólido se dividen en dos grupos principales que son los qubits superconductores y los qubits semiconductores. El objetivo del presente artículo es que un lector no especialista conozca con el mayor detalle posible las diferentes tec-

nologías de computación cuántica de frontera. Para lo anterior se abordarán de una manera comprensiva los cubits semiconductores y los cubits superconductores.

Cubits semiconductores

Dentro de esta tecnología se implementan experimentalmente los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ empleando el momento angular intrínseco o espín de los electrones (Weinberg, 2021). El espín $1/2$ de los electrones en un campo magnético llamados convencionalmente como espín arriba $|\uparrow\rangle = |0\rangle$ y espín abajo $|\downarrow\rangle = |1\rangle$. Con ruido cuántico la señal de espín se pierde. En cubits superconductores la principal fuente de ruido cuántico son los fonones. Para evitar el ruido cuántico se mantienen los cubits confinados a muy bajas temperaturas. Dicho confinamiento puede ser artificial usando la técnica de puntos cuánticos como se muestra en la Figura 1. Aunque el confinamiento puede ser natural insertando impurezas en algún material como en la computadora cuántica de diamante o Vacancia NV donde se inserta una impureza de nitrógeno cerca de una vacante en diamante (López, 2014). En dicho dispositivo el ruido cuántico producido por la interacción espín-orbita se disminuye debido a la pequeña masa de los átomos de carbón. Lo anterior hace que el tiempo de decoherencia (tiempo en el cual la señal de los cubits no se pierde), el tiempo donde es posible hacer un óptimo procesamiento cuántico de la información, sea de miles de milisegundos aun a temperatura ambiente. Una de las más famosas propuestas de impurezas fue hecha por Bruce Kane (Fuechsle, 2012). En dicha tecnología se inserta una impureza de fósforo en silicio. En el año de 2014 en Australia se empleó silicio purificado isotópicamente para demostrar que cubits de espines nucleares y electrones tenían

tiempos de coherencia de 600 ms y 270 ms respectivamente (Fuechsle, 2012). Dichos tiempos son los tiempos de coherencia más largos en dispositivos de estado sólido hasta la fecha. No obstante, dicha tecnología tiene un gran inconveniente, y es que las impurezas tienen que ser colocadas en la red de silicio con precisión atómica para conseguir interacciones entre cubits predecibles.

Cubits superconductores

Esta tecnología de computadoras cuánticas es una de las más prometedoras para su construcción. Ofrece las siguientes ventajas: a) Operan a muy bajas temperaturas; b) Se puede manipular su espectro de energías de una manera extremadamente precisa; c) Ofrecen una fácil manufactura. En las Figuras 2, 3 y 4 se muestra cómo se consiguen los estados superconductores $|0\rangle$ y $|1\rangle$ así como superposiciones dadas por la ecuación (1). En dicha figura, el circuito por el que circulan las corrientes es superconductor. Lo anterior implica que las corrientes fluyen constantes a perpetuidad por el circuito. Las dimensiones físicas de dichos circuitos son de cientos de micrones, lo cual facilita la manipulación de cubits. Sus tiempos de coherencia son menores que los cubits semiconductores. La primera demostración experimental de cubits superconductores se le atribuye a la compañía japonesa NEC en 1999. Lo anterior disparó el desarrollo de dispositivos basados en superconductores en los laboratorios de cómputo cuántico en el mundo. Inmediatamente se clasificaron estos dispositivos en tres diferentes tipos. Por una parte, se usaron los pares de Cooper (cubit de carga), también se usó la dirección de las corrientes por el anillo (cubit de flujo) y por último el estado oscilatorio del circuito (cubit de fase). Los diseños modernos de hoy día son va-

riaciones de estos tres diferentes tipos. El más popular es el así llamado Transmon o también llamado fluxonium (Transmons, 2021). Los transmones se controlan con señales de microondas, voltajes, campos magnéticos y corrientes eléctricas en escalas de tiempo de 10 ns. Actualmente los dispositivos más avanzados como los de IBM (IBM, 2021) manejan tiempos de decoherencia de 120 μ s.

Discusión

Los tres diferentes tópicos de frontera más relevantes en las ciencias de la computación contemporáneas son los siguientes tres: (i) Computación cuántica; (ii) Inteligencia artificial; (iii) Realidad aumentada. Si la prioridad actual del país en materia de Ciencia, Tecnología e innovación son las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), entonces la computación cuántica es una prioridad para el desarrollo científico, tecnológico y económico del país. De acuerdo con lo anterior, el desarrollo e implementación de una computadora cuántica operativa en el país está dentro de la agenda básica de desarrollo. Con dicho logro el país se situaría a la vanguardia de Latinoamérica y del mundo. El presente trabajo pretende ser un esfuerzo modesto para documentar, ilustrar y motivar a todos aquellos lectores, potenciales científicos, para que despierte su interés en desarrollar e implementar una computadora cuántica operativa que pueda competir con las diferentes tecnologías que se desarrollen en el mundo.

Conclusiones

Los cubits de cadenas de espines nucleares son las que ofrecen más ventajas. Las tecnologías de centros NV de diamante son una de las más prometedoras aunque son muy difíciles de manipular. Sin duda,

la tecnología más evolucionada y avanzada es la de cubits superconductores en particular la de transmones, de IBM. El reto tecnológico presente es desarrollar tecnologías de cubits más refinadas con tiempos de decoherencia en escalas de microsegundos.

Membrete de Autores

Dr. Manuel Ávila Aoki, CIVESTAV 1987. M. en C.: José Román Castro San Agustín, UAEMex 2023.

A. Akari Uc Guerra, Estudiante de Licenciatura, UAEMex 2023.

Glosario

- *Espín o momento angular intrínseco*. Es el momento angular de giro de una partícula con respecto a su propio eje.

- *Punto cuántico*. Es un electrón confinado a una pequeña región del espacio de diámetro aproximado 10-9 m.

- *Superconductor*. Es un material que no ofrece ninguna resistencia al paso de la corriente eléctrica. También se dice que tiene resistencia cero.

- *Semiconductor*. Material que permite el paso de la corriente eléctrica pero con resistencia significativa.

- *Pares de Cooper*. Pareja de electrones que se hallan ligados en un material superconductor debido a que en el estado superconductor de ambas partículas se comportan como si se atrajeran, pese a tener ambas carga de igual signo, debido a que interactúan a través de la red cristalina formada por los iones positivos del metal (Cooper, 1956).

- *Estado oscilatorio del circuito*. Es el estado de oscilación del sentido de las corrientes que fluyen por el circuito.

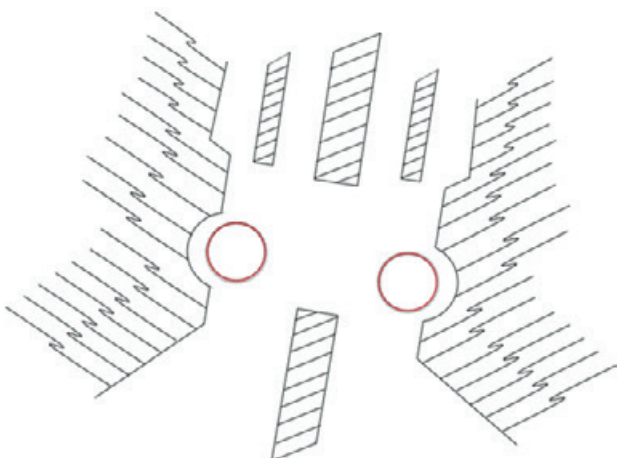
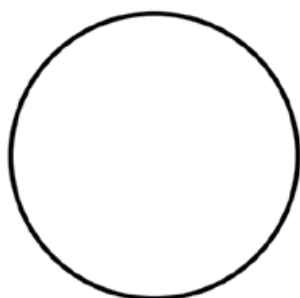


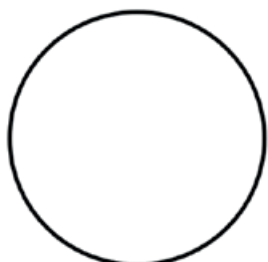
Figura 1. Dos puntos cuánticos (electrones confinados) en el cristal formado por GaAs.



i_0

$|0\rangle$

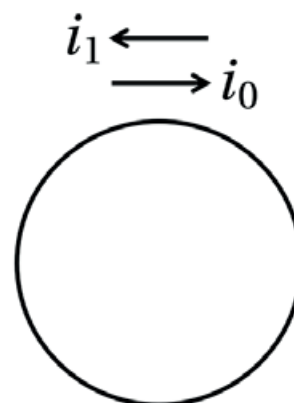
(a)



i_1

$|1\rangle$

(b)



$$|\psi\rangle = A|0\rangle + B|1\rangle$$

(c)

Figura 2. (a) Una corriente circulando en contra de las manecillas del reloj en un anillo superconductor define el estado $|0\rangle$. (b) Una corriente circulando en favor de las manecillas del reloj en un anillo superconductor define el estado $|1\rangle$. (c) Dos corrientes circulando en sentidos opuestos en un anillo superconductor definen la superposición de la Ec. (1).

Bibliografía

Cooper L. (1956). Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas. *Physical Review* 104 (4):1189.

Fuechsle M, Miwa JA, Mahapatra S, Ryu H, Lee S, Warschkow O, Hollenberg LCL, Hidary JD (2019). *Quantum Computing: An Applied Approach*, Springer.

López GV (2014). Diamond as a Solid State Quantum Computer with a Linear Chain of Nuclear Spins System. *J. of Mod. Phys.* 5:55.

Montanaro A (2016). Quantum algorithms: an overview. *Npj Quantum Information* 2:15023.

Monz T, Schindler P, Barreiro JT, Chwalla M, Nigg D, Coish WA, Harlander M, Han-

sel W, Hennrich M and Blatt R (2011). 14-cubit entanglement: Creation and coherence. *Phys. Rev. Lett.* 106:130506.

The IBM quantum experience (2021). <http://www.research.ibm.com/ibm-q>. Recuperado 3 Noviembre 2021.

Transmons (2021). *Introduction to transmon physics*. Qiskit.

Weinberg S (2021). *Foundations of Modern Physics*. Cambridge University Press.